

## طراحی و ساخت تبخیر کننده خورشیدی همراه با آینه‌های متمرکز کننده نور

مجید پاکیزه\*، سعید جاوی مقدم، مهدیه نامور محبوب

مشهد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی شیمی

پيام نگار pakizeh@um.ac.ir

### چکیده

امروزه استفاده از تبخیرکننده‌های خورشیدی به دلیل مصرف پایین انرژی، ملاحظات زیست محیطی، سهولت عملکرد و هزینه پایین به عنوان جایگزین مناسب برای وسایل حرارتی با سوخت فسیلی مورد توجه محققین قرار گرفته است. در این تحقیق ابتدا مروری بر انواع تبخیرکننده‌های خورشیدی و نحوه عملکرد آنها انجام شده و در ادامه مراحل طراحی و ساخت تبخیرکننده خورشیدی با قابلیت استفاده در واحدهای مسکونی ارائه شده است. مصرف برق دستگاه ساخته شده روزانه ۸۰۰ وات ساعت می‌باشد و حداکثر ۴۸ لیتر در روز محصول آب مقطر تولید می‌کند. هزینه تمام شده دستگاه در سه حالت: تبخیر ۸۰٪ آب ورودی با بازدهی ۱۰۰٪ و ۵۰٪ جذب انرژی خورشیدی، تبخیر ۱۰۰٪ آب ورودی با بازدهی ۵۰٪ جذب انرژی خورشیدی بدون بازیابی انرژی بخار تولیدی و تبخیر ۱۰۰٪ آب ورودی با بازدهی ۵۰٪ جذب انرژی خورشیدی با بازیابی انرژی بخار تولیدی در دو حالت ۵۰٪ و ۷۵٪ محاسبه و نتایج حاصل ارائه شده است.

**کلمات کلیدی:** تبخیر کننده خورشیدی، محیط زیست، انرژی خورشیدی، نمک‌زدایی، انرژی حرارتی

### ۱- مقدمه

سوخت فسیلی به عنوان اصلی‌ترین منبع تأمین کننده انرژی در صنایع فرایندی همواره مورد توجه بوده است. مصرف بالای انرژی در فرایندهایی نظیر تبخیر، خشک کردن، استخراج و تقطیر علاوه بر کاهش منابع سوخت فسیلی، سبب آلودگی محیط زیست می‌شود. تولید گاز گلخانه‌ای دی اکسید کربن، گرمایش زمین و همچنین تولید بارانهای اسیدی نمونه‌ای از مشکلات ایجاد شده در نتیجه استفاده از سوخت های فسیلی می‌باشد. بنابراین جایگزینی سوخت فسیلی با منابع انرژی نامحدود، دوستدار محیط زیست و ارزان نظیر انرژی خورشیدی، ضروری به نظر می‌رسد.

انرژی ورودی به سطح زمین در نتیجه تابش خورشید به طور متوسط

۱۰۲۰۰۰ تراوات در روز می‌باشد که ۰/۰۰۰۱ آن کل انرژی مورد نیاز بشر را تأمین می‌کند [۱ و ۲]. میزان تابش خورشیدی در ایران بین ۱۸۰۰ تا ۲۲۰۰ کیلووات ساعت بر متر مربع می‌باشد. تعداد روزهای ابری پی در پی در سراسر کشور کمتر از ۵ روز و شفافیت هوا در اکثر نقاط ایران بیش از ۶۰٪ می‌باشد. موارد فوق، موقعیت جغرافیایی، شرایط اقلیمی و آب هوایی ایران سبب شده است تا این کشور را لحاظ دریافت انرژی خورشیدی در بین مناطق مختلف جهان از پتانسیل بالایی برخوردار باشد. [۱].

مطالعات بسیاری جهت استفاده از انرژی خورشیدی به عنوان منبع انرژی رایگان انجام شده است که از آن جمله می‌توان به ساخت نیروگاههای فوتوولتاییک جهت تبدیل انرژی خورشیدی به انرژی

در این تحقیق ابتدا مروری بر انواع تبخیرکننده‌های خورشیدی و نحوه عملکرد آنها انجام و در ادامه مراحل طراحی و ساخت یک تبخیرکننده (آب شیرین کن) خورشیدی با قابلیت استفاده در واحدهای مسکونی ارائه شده است. همچنین هزینه تمام شده دستگاه در سه حالت تبخیر ۸۰٪ آب ورودی با بازدهی جذب ۱۰۰٪ و ۵۰٪ جذب انرژی خورشیدی، تبخیر ۱۰۰٪ آب ورودی با بازدهی جذب ۵۰٪ جذب انرژی خورشیدی بدون بازیابی انرژی بخار تولیدی و تبخیر ۱۰۰٪ آب ورودی با بازدهی جذب ۵۰٪ جذب انرژی خورشیدی با بازیابی انرژی بخار تولیدی در دو حالت ۵۰٪ و ۷۵٪ مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- فناوری‌های مهار انرژی خورشیدی و استفاده از آنها

در فرایندی نظیر تولید بخار مافوق گرم، انرژی تابشی خورشید بر واحد سطح برای تولید بخار کافی نیست. برای رفع این مشکل با استفاده از آینه‌های مخصوص، نور خورشید تا چند ده برابر بر روی دیگ بخار متمرکز می‌شود، به نحوی که دمای دیگ بخار تا ۱۵۰۰ درجه افزایش می‌یابد و انرژی مورد نیاز برای تولید بخار مافوق گرم فراهم می‌شود [۱]. بنابراین نحوه مهار انرژی در دستگاه‌های خورشیدی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. انواع سیستم‌های استفاده از انرژی خورشیدی به‌طور خلاصه در جدول (۱) ارائه شده است [۱۱].

الکتریکی، شیرین سازی آب، ساخت موتورهای حرارتی جهت سیستم گرمایشی و سرمایشی ساختمان‌ها و تبخیرکننده‌ها اشاره کرد [۳-۵]. در این بین شیرین سازی آب با استفاده از انرژی الکتریکی و یا حرارتی تولید شده به کمک تابش نور خورشید بسیار مورد توجه محققین قرار گرفته است [۶-۸]. نوعی از تبخیرکننده‌ها که جهت شیرین سازی آب مورد استفاده قرار می‌گیرند مستقیماً انرژی خورشیدی را به انرژی حرارتی تبدیل کرده و طی فرایند (تبخیر - میعان) محصول مقطر را با صرف انرژی حداقل ارائه می‌دهند. در طراحی تبخیرکننده خورشیدی مواردی نظیر شکل و جنس تبخیرکننده، عایق کاری حرارتی و آب بندی دستگاه جهت جلوگیری از نشت بخار باید مورد توجه قرار گیرد [۹].

در زمینه استفاده از انرژی خورشیدی در ایران نیز فعالیتهای بسیاری انجام شده‌است که از آن جمله می‌توان به راه اندازی نیروگاه خورشیدی سهموی خطی ۲۵۰ کیلووات شیراز، راه اندازی نیروگاه خورشیدی ۱ مگاوات از نوع دریافت‌کننده مرکزی در طالقان، نصب پمپ فتوولتائیک جهت تأمین آب مورد نیاز کشاورزی، ساخت و نصب چراغهای خیابانی فتوولتائیک در مرکز تحقیقات و آموزش مدیریت واقع در مهرشهر کرج، ساخت و نصب سیستم فتوولتائیک برای تأمین برق پاسگاه‌های مرزی کشور، اجرای پروژه ۴۵ کیلو وات برق فتوولتائیک متصل به شبکه و ساخت و نصب کلکتور سهموی خطی در واحد آموزش مدیریت شهر کرج اشاره کرد [۱۰].

جدول ۱- انواع فناوری‌های مهار انرژی خورشیدی

| کاربرد  | نوع خاص تکنولوژی   | گروه تکنولوژی     |
|---|--|-------------------|
| برای گرمایش آب به‌صورت تجاری مثلاً استخرهای شنا یا آب منازل ویلایی- آپارتمانی- هتلها یا سایر ساختمانها<br>برای گرمایش فضای ساختمان<br>گرمای فرایندی مورد نیاز کشاورزی | ورق صاف فلزی<br>ورق صاف پلاستیکی<br>تمرکز کم<br>گلخانه- محصول خشک کنی      | حرارتی کم دما     |
| برای گرمایش فضای خانه های خصوصی   | شیشه ذخیره   | معماری خورشیدی    |
| استفاده از یک منبع خورشیدی برای تولید الکتریسیته از یک چرخه ترمودینامیکی  | استخر خورشیدی<br>سهموی خطی<br>بشقابک- موتور استرلینگ<br>دریافت‌کننده مرکزی | حرارتی- برقی      |
| انرژی نوری را مستقیماً به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند   | عدسی فرنل  | تمرکزی فتوولتائیک |

## ۱-۲ برج خورشیدی

در سیستم برج خورشیدی، آینه‌های تخت متصل به سیستم دنبال کننده خورشیدی واحد هستند و به صورت دایره وار حول یک برج بلند چیده می‌شوند. آینه‌ها با تغییر زاویه در طول روز، نور خورشید را روی دیگ بخار در بخش بالای برج منعکس می‌کنند تا انرژی لازم برای تولید بخار فراهم آید. نمایی از سیستم برج خورشیدی در شکل (۱) مشاهده می‌شود [۱۲].

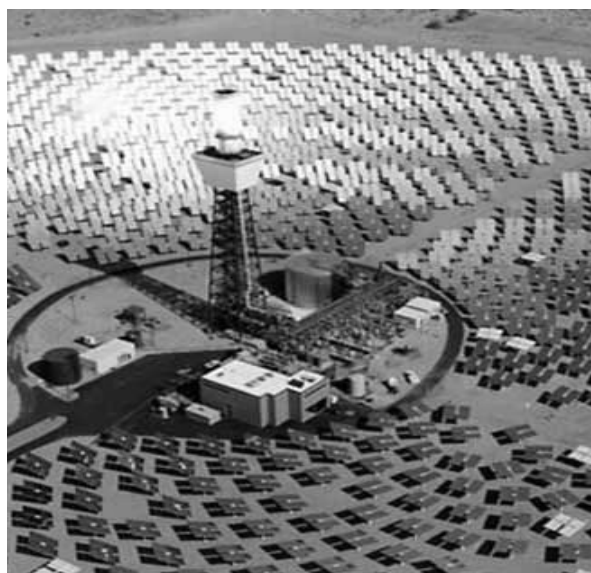


ISNA/PHOTO: YOUTUBE

(الف)



(ب)



شکل ۱- نمایی از نیروگاه برج خورشیدی

شکل ۲- (الف) مقیاس کوچک (خانگی)، (ب) مقیاس بزرگ (صنعتی)

## ۲-۲ آینه‌های دیشی

اگر چه آینه‌های دیشی عمدتاً در مقیاس کوچک و دستگاه‌هایی نظیر اجاق خورشیدی استفاده می‌شوند، اما گاهی در مقیاس صنعتی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند (شکل (۲)). این نوع از ابزار مهار انرژی خورشید می‌تواند تمام نور را در نقطه بسیار کوچکی متمرکز و دمای بسیار بالایی تولید کند. از دیگر مزیت‌های این روش استفاده آسان و همچنین سبکی دستگاه در مقیاس کوچک می‌باشد که امروزه کاربرد وسیعی یافته است [۱۲].

## ۳-۲ آینه‌های سهموی خطی

در این روش از آینه‌های سهموی خطی برای متمرکز کردن نور روی کانون آینه‌ها استفاده می‌کنند. در کانون آینه‌ها یک لوله حاوی آب یا روغن برای جذب انرژی گرمایی قرار داده می‌شود



شکل ۳- مقیاس صنعتی آینه‌های سهموی خطی

### ۳- ساخت تبخیرکننده با آئینه‌های متمرکزکننده نور برای تولید آب مقطر

در این تحقیق نوع ساده‌ای از تبخیرکننده جهت شیرین سازی آب حاوی یون کلسیم و منیزیم مورد بررسی واقع شده است. دستگاه قطعه متحرک نداشته و از مواد گالوانیزه و شیشه ساخته شده است. دارای عمر مفید بیشتر از ۱۵ سال بوده و هزینه ساخت دستگاه نسبت به نمونه‌های دیگر کمتر می باشد. قطعات مورد نیاز جهت ساخت دستگاه در جدول (۲) آورده شده است.

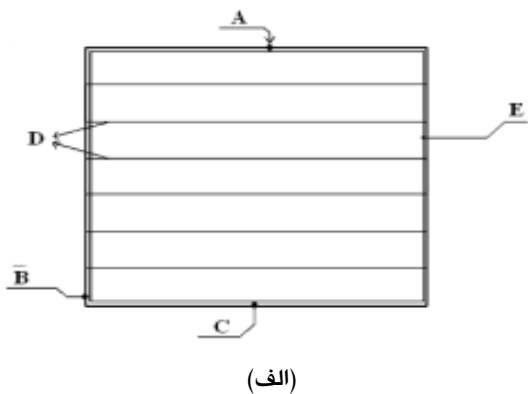
جدول ۲- وسایل مورد نیاز و هزینه ساخت دستگاه  
به ابعاد نیم متر مربع

| وسایل لازم            | اندازه         | قیمت (تومان) |
|-----------------------|----------------|--------------|
| شیشه دو جداره         | ۷۰×۷۰ سانتیمتر | ۲۵۰۰۰        |
| شیشه ساده             | ۶۵×۶ سانتیمتر  | ۱۵۰۰         |
| جعبه گالوانیزه        | ۷۰×۷۰ سانتیمتر | ۴۰۰۰۰        |
| جعبه گالوانیزه        | ۷۶×۷۶ سانتیمتر | ۳۰۰۰۰        |
| پشم شیشه              | ۱/۴×۱/۴ متر    | ۴۰۰۰         |
| عایق آکاسیف           | ۷۶×۷۶ سانتیمتر | ۲۰۰۰         |
| ۴ قطعه آئینه          | ۷۰×۷۰ سانتیمتر | ۲۵۰۰۰        |
| شلنگ آب               | ۱۰ متر         | ۱۰۰۰۰        |
| بدنه آهنی نگه دارنده  | به مقدار لازم  | ۲۰۰۰۰        |
| بدنه آهنی زیر دستگاه  | به مقدار لازم  | ۱۰۰۰۰        |
| کناره‌های آلومینیومی  | ۱۲ متر         | ۱۰۰۰۰        |
| رنگ سیاه              | ۱ کیلوگرم      | ۵۰۰۰         |
| پیچ و مهره‌ها و شیرها | به تعداد لازم  | ۵۰۰۰         |
| مخزن ۱۰ لیتری         | یک عدد         | ۵۰۰۰         |
| پمپ آب ۵۰ وات         | یک عدد         | ۱۰۰۰۰        |
| پکینگ شیشه‌ای         | ۸ کیلوگرم      | خرده         |
| کمپرسور بخار          | یک عدد         | ۳۰۰۰۰        |
| مارپیچ خنک کننده      | یک عدد         | ۱۵۰۰۰        |
| محفظه پمپاژ           | یک عدد         | ۲۵۰۰         |
| هزینه ساخت            | -              | ۵۰۰۰۰        |
| جمع کل                | -              | ۳۰۰۰۰۰       |

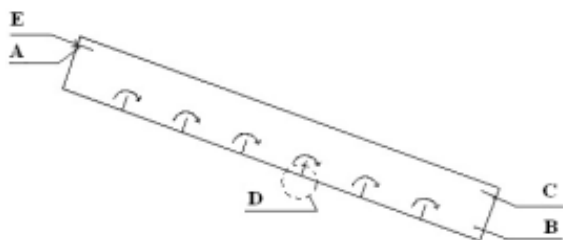
### ۳-۱ نحوه ساخت آب شیرین کن خورشیدی

ساخت دستگاه شامل ۴ مرحله: ساخت جعبه گالوانیزه داخلی و خارجی، جایگذاری شیشه دوجداره، اتصال آینه‌های مهارکننده انرژی خورشیدی و اتصال بخش‌های مختلف دستگاه برای انتقال و جمع‌آوری آب مقطر تولیدی می‌باشد. در ذیل، این مراحل به تفصیل بیان شده است.

دو جعبه گالوانیزه داخلی و خارجی مطابق شکل‌های (۴) و (۵) ساخته می‌شوند. ابعاد جعبه داخلی ۷۰×۷۰ سانتیمتر با ارتفاع ۱۵ سانتیمتر است. داخل جعبه تیغه‌هایی با فاصله ۱۰ و ارتفاع ۴ سانتیمتر نصب می‌شوند (شکل (۴)-(ب)). لبه یک سانتیمتری در ارتفاع ۱۳ سانتیمتری کف جعبه برای قرار گرفتن شیشه دو جداره در جداره داخلی نصب می‌گردد. برای ورود و خروج آب در دستگاه روزنه‌هایی در بالا (برای ورود آب) و پایین (برای خروج آب مقطر و آب پسماند) جعبه طبق شکل (۴) تعبیه می‌شود. به جداره داخلی جعبه گالوانیزه داخلی رنگ سیاه زده می‌شود، به این ترتیب ضریب جذب نور در جداره داخلی به حداکثر مقدار خود می‌رسد.

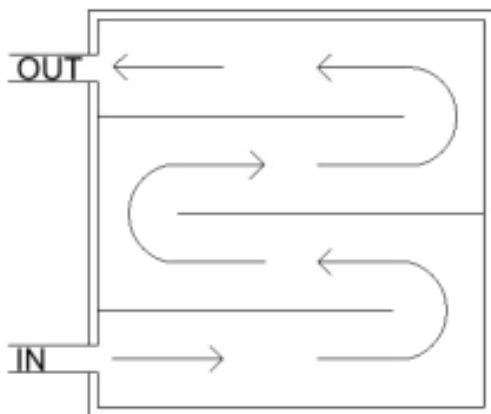


(الف)



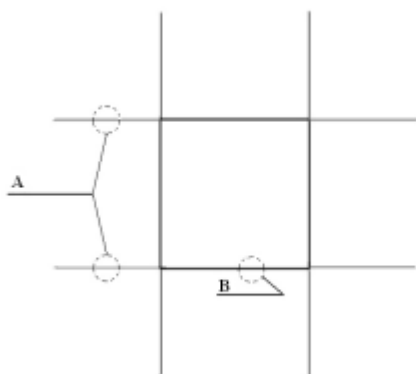
(ب)

شکل ۴- (الف) نمای بالای جداره داخلی، (ب) نمای کنار جداره داخلی (A: خروجی بخار در سیستم مکش دار، B: خروجی پساب، C: خروجی آب مقطر، D: تیغه‌های نگه دارنده آب، E: لبه‌های نگه‌دارنده شیشه دوجداره)



شکل ۶- شیشه دو جداره

آینه‌ها روی بدنه نگه دارنده ساخته شده طبق شکل (۷) با زاویه ۶۰ درجه نسبت به افق متصل می‌گردد. سپس همراه با بدنه نگه دارنده روی درب جعبه گالوانیزه با پیچ نصب می‌شود. بدنه آهنی زیر دستگاه که زاویه نسبت به خورشید را تنظیم می‌کند با طرح دلخواه ساخته شده و کل دستگاه روی آن قرار می‌گیرد.



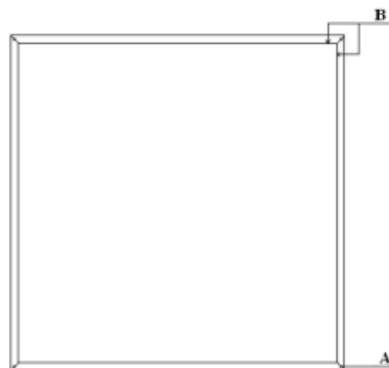
(الف)



(ب)

شکل ۷- بدنه نگه دارنده آینه‌ها (الف) از نمای بالا، (ب) از نمای کنار (A): دسته‌های نگه دارنده آینه‌ها به طول ۷۵ سانتیمتر، B: قاب مربعی شکل به ابعاد ۷۰×۷۰ سانتیمتر که روی جداره خارجی پیچ می‌شود.

جعبه خارجی با ابعاد ۱۸×۷۶×۷۶ سانتیمتر طبق شکل (۵) ساخته می‌شود. دهانه بالایی جعبه از هر طرف لبه‌هایی به عرض ۳ سانتیمتر دارد که پس از قرار گرفتن جعبه داخلی در جعبه خارجی فاصله بین دو جعبه را می‌پوشاند تا آب بین دو جداره نفوذ نکند. همچنین تمام حفرات ورودی و خروجی در جداره خارجی شبیه جداره داخلی تعبیه می‌گردد.



شکل ۵- جداره خارجی از نمای بالا (A): محل قرار گرفتن پیچ اتصال دهنده جداره خارجی به نگه دارنده آینه‌ها، B: لبه‌های خارجی پوشاننده فاصله بین جداره داخلی و جداره خارجی

در کف بدنه گالوانیزه خارجی لایه‌ای به ضخامت ۳ سانتیمتر در ابعاد ۷۶×۷۶ از عایق آکاسیف (یونولیت) قرار داده شده و سپس یک لایه پشم شیشه روی آن نصب می‌گردد. سپس، بدنه گالوانیزه داخلی در بدنه گالوانیزه خارجی قرار گرفته و داخل دستگاه، بین تیغه‌ها یک لایه از پکینگ‌های شیشه‌ای (خرده شیشه) به ضخامت ۱ تا ۲ سانتیمتر ریخته می‌شود. به این ترتیب سطح تماس برای انتقال گرما افزایش یافته و انرژی نوری توسط شیشه به دام انداخته می‌شود.

شیشه دو جداره مطابق شکل (۶) ساخته شده و قطعه شیشه‌ای ۶۵×۶۵ سانتیمتری شامل روزنه در مرکز برای خروج آب کندانس شده در زیر شیشه دو جداره با فاصله ۲/۵ سانتیمتر از دو طرف و ۲ سانتیمتر از پایین قرار می‌گیرد. به این ترتیب امکان جمع‌آوری آب کندانس شده فراهم می‌شود. جریان آب سرد بین دو جداره شیشه در تماس غیر مستقیم با بخار، پیش گرم شده و بخار را کندانس می‌کند. بخار کندانس شده به‌عنوان محصول نهایی جمع‌آوری و از دستگاه خارج شود.

برای کارکرد بهتر دستگاه در جداره داخلی و جداره خارجی، روزنه‌ای برای خروج بخار و ایجاد خلأ تعبیه و با شلنگ خروجی به کمپرسور وصل می‌شود. علاوه بر این می‌توان از روش‌های دیگری نظیر فناوری (اچ دی<sup>۱</sup>) برای بهره‌وری هرچه بیشتر دستگاه استفاده کرد. در این روش هوا به داخل محفظه دستگاه دمیده شده و در اثر گرمای حاصله از نور خورشید گرم می‌شود. هوای گرم قابلیت جذب و حمل مقدار قابل توجهی بخار آب را دارد که در کمپرسور متراکم و مایع می‌شود. سپس در ماریپج خنک‌کننده سرد شده و به مخزن آب مقطر منتقل می‌شود. این روش کارایی بسیار بالایی داشته و به دلیل تولید آب بیشتر با مصرف انرژی گرمایی کمتر مورد توجه دانشمندان قرار گرفته است [۱۳-۱۵].

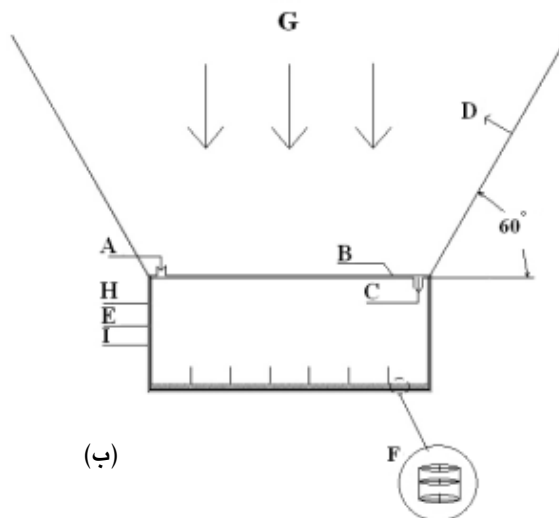
پس از اطمینان از اتصال صحیح قطعات، دستگاه آماده بهره برداری می‌شود. در ابتدای روز پمپ آب به صورت دستی روشن شده و آب را از طریق شناوری متصل به آب شهر پمپ کرده و وارد فضای خالی بین دوجداره شیشه می‌کند. پس از پر شدن فضای خالی بین دوجداره شیشه، آب از روزنه تعبیه شده روی جداره داخلی شیشه دوجداره به داخل دستگاه می‌ریزد. سپس، با عبور از تیغه‌های نگه‌دارنده آب به سمت پایین سرریز می‌شود که مقداری از آن بخار می‌شود. مابقی آب توسط لوله به محفظه ماریپژ برمی‌گردد و دوباره چرخه تکرار می‌شود. در چرخه تکرار شناور فقط مقدار آبی را که تبخیر شده به صورت جریان جبرانی به محفظه وارد می‌کند. بخار تولیدی در زیر سطح شیشه دوجداره بالایی که آب در آن جریان دارد مایع می‌شود و به پایین می‌لغزد. این آب در نهایت در محل جمع‌آوری وارد شده و توسط یک شلنگ به مخزن آب مقطر می‌ریزد. در صورت قرار دادن کمپرسور مقداری از بخار از دستگاه مکش شده و بعد از تراکم و سرد شدن آب مایع به مخزن آب مقطر فرستاده می‌شود.

بر مبنای تابش ۱۰۰۰ وات بر متر مربع، شدت تابش روی صفحه شیشه‌ای دو جداره به ابعاد ۰/۵ متر مربع ۱۵۰۰ وات است که ۵۰۰ وات آن به صورت مستقیم و ۱۰۰۰ وات دیگر از چهار آئینه (هر کدام ۲۵۰ وات) به صورت انعکاسی به داخل دستگاه منعکس می‌شود. بازدهی انعکاس آئینه‌ها ۱۰٪ در نظر گرفته شده است. بیشترین بازدهی تولید آب مقطر زمانی است که خورشید به صورت عمودی به دستگاه بتابد. بنابراین اگر یک دستگاه دنبال‌کننده خورشیدی روی

در مرحله نهایی ساخت دستگاه، شلنگ مخصوص خروجی پساب به پمپ آب و خروجی پمپ به ورودی شیشه دو جداره متصل می‌شود. خروجی شیشه دو جداره داخل دستگاه قرار گرفته که آب را دوباره از بالا به داخل دستگاه برمی‌گرداند. در نهایت شلنگ خروجی آب مقطر به مخزن جمع‌آوری آب متصل می‌شود. خروجی بخار آب دستگاه به کمپرسور و خروجی کمپرسور به ماریپج خنک‌کننده وصل و سپس خروجی ماریپج نیز به مخزن جمع‌آوری متصل می‌شود. نمای کلی دستگاه در شکل (۸) قابل مشاهده است.



(الف)



(ب)

شکل ۸- (الف) نمای دستگاه ساخته شده در این تحقیق (ب) نمای جانبی دستگاه A: لوله ی آب سرد ورودی به شیشه دوجداره، B: شیشه دو جداره، C: خروجی آب از شیشه دوجداره، D: آئینه ها، E: عایق، F: پکینگ‌های استوانه‌ای از جنس شیشه، G: انرژی تابشی خورشید، H: جعبه گالوانیزه داخلی، I: جعبه گالوانیزه خارجی

ایده‌آل از کل گرمای ورودی به داخل دستگاه ۱۰۰٪ آن جذب می‌شود. مقدار  $Q_{total}$  از معادله (۳) بر مبنای ۱ ساعت از روز معادل ۳۶۰۰ ثانیه به دست می‌آید. در این حالت از کل مقدار آب ورودی در روز ۸۰٪ آن تبخیر شده و ۲۰٪ آن به عنوان پساب غنی از املاح باقی می‌ماند. بنابراین داریم:

$$M = 0.8m \quad (4)$$

که  $m$  مقدار آب ورودی و  $M$  مقدار آب تقطیر شده است. با ترکیب رابطه‌های (۱) تا (۴) مقدار آب ورودی و تقطیر شده بر حسب لیتر در ساعت به دست می‌آید.

حالت ۱ با جذب ۱۰۰٪ انرژی ورودی محاسبات را انجام می‌دهد. اما ممکن نیست که ۱۰۰٪ انرژی ورودی جذب شود پس در محاسبات بعدی مبنا بر اساس ۵۰٪ انرژی جذب شده لحاظ می‌گردد و بقیه صرف تلفات و هدر رفت انرژی می‌گردد. با تکرار محاسبات قبل در ۵۰٪ جذب انرژی ورودی مقدار آب ورودی و تقطیر شده به دست می‌آید. برای یک روز ۸ ساعته (به دلیل قرار دادن دنبال کننده خورشید) مقدار محصول به دست آمده بر حسب لیتر بر روز برابر است با:

$$M_t = M.T \quad (5)$$

$M_t$ ، مقدار کل آب مقطر به دست آمده در روز،  $M$  مقدار آب مقطر به دست آمده در یک ساعت و  $T$  ساعات تابش نور در روز است. برای محاسبات اقتصادی سالانه، قیمت هر لیتر آب مقطر،  $P$ ، ۲۰۰ تومان در نظر گرفته شده است و در طول سال  $Y = 300$  روز آفتابی موجود می‌باشد. به این ترتیب درآمد سالیانه از معادله ۵ محاسبه می‌شود:

$$\text{درآمد سالیانه} = M_t.P.Y \quad (6)$$

#### ۴-۲ با فرض عدم بازیابی انرژی بخار تولیدی و با دنبال کننده خورشیدی (حالت ۲)

در این حالت فرض می‌شود تمام آب ورودی به دستگاه تبخیر شود و در طول روز از انرژی بخار خروجی استفاده نشود. مقدار  $Q_{total}$  و جرم آب تبخیر شده بر اساس انرژی تابشی خورشید با بازدهی جذب

تبخیر کننده قرار داده شود بازدهی تولید آب مقطر در تبخیر کننده افزایش می‌یابد که در بخش ۴، محاسبات بر اساس این فرض انجام گرفته است.

#### ۴- محاسبات

در این بخش برای درک بهتر دستگاه محاسبات در سه حالت متفاوت انجام شده و تمام نتایج محاسبات در جدول (۳) ارائه شده است. در کلیه محاسبات دمای اولیه آب و نقطه جوش به ترتیب  $T_1 = 20$  و  $T_2 = 100$  درجه سلسیوس فرض شده و مقدار آنتالپی بخار و مایع و بقیه پارامترها از جداول ترمودینامیکی [۱۶] محاسبه شده است.

#### ۴-۱ با فرض عدم بازیابی انرژی بخار تولیدی و داشتن دنبال کننده خورشید (حالت ۱)

$$Q_1 = MC_p(T_2 - T_1) \quad (1)$$

$Q_1$ ، گرمایی که به آب داده می‌شود تا به دمای جوش برسد و  $C_p$  ظرفیت گرمایی آب (معادل ۴۲۰۰ ژول بر کیلوگرم بر کلونین) است.

$$Q_2 = M(H_V - H_1) \quad (2)$$

$Q_2$ ، گرمای نهان تبخیر مقدار آبی که تبخیر شده  $H_V = 2676000$  و  $H_1 = 419100$  بترتیب آنتالپی بخار و مایع در ۱۰۰ درجه سلسیوس بر حسب ژول بر کیلوگرم می‌باشد.

$$Q_{total} = Q_1 + Q_2 = E.t.F \quad (3)$$

که  $Q_{total}$ ، کل گرمای مورد نیاز ورودی،  $E$  شدت تابش برواحد سطح بر واحد زمان،  $t$  زمان تابش بر حسب ثانیه و  $F$  بازدهی جذب انرژی است.  $Q_{total}$  همان انرژی خورشیدی ورودی که معادل ۳۰۰۰ وات بر مترمربع دستگاه است. برای دستگاهی به اندازه ۰/۵ مترمربع، ۱۵۰۰ وات می‌باشد که باید در زمان تابش بر حسب ثانیه ضرب گردد تا بر حسب ژول بر ساعت محاسبه شود. در حالت

۵۰٪ مثل حالت قبل با استفاده از معادله (۳) محاسبه می‌شود:

$$Q_{total}/day = Q_{total} T \quad (7)$$

که  $T$ ، ساعت‌های تابش نور خورشید است. با استفاده از معادلات (۱)، (۲) و (۷) معادله (۸) نتیجه می‌شود:

$$Q_{total}/day = \{m C_P (T_2 - T_1) + M (H_V - H_1)\} T \quad (8)$$

با توجه به اینکه در فرض‌های انجام شده تمام آب ورودی تبخیر می‌شود بنابراین  $m=M$  است و در نهایت از معادلات (۷) و (۸) مقدار  $m$  محاسبه می‌گردد.

#### ۳-۴ با فرض بازیابی انرژی و با دنبال کننده خورشیدی (حالت ۳)

برای افزایش بهره‌وری باید از انرژی بخار برای پیش گرمایش آب سرد ورودی استفاده شود. به این ترتیب از اتلاف مقدار زیادی انرژی جلوگیری می‌گردد و در نتیجه آن بازدهی تولید آب مقطر افزایش می‌یابد. به این ترتیب دستگاه می‌تواند در شدت تابش خورشید مشابه آب مقطر بیشتری تولید کند. در حالت ۳ فرض می‌شود بخار خروجی در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس از حالت بخار اشباع به مایع اشباع تبدیل شده و ۵۰٪ انرژی گرمای نهان تبخیر بازیابی شود. بنابراین داریم:

$$Q_3 = 0.5 \{M (H_V - H_1)\} = 0.5 Q_2 \quad (9)$$

در این رابطه  $Q_3$ ، مقدار گرمای بازیابی شده است. با ترکیب معادلات (۳) و (۹) و موازنه انرژی معادله (۱۰) حاصل می‌شود:

$$Q_{total}/day + Q_3 = Q_1 + Q_2 \Rightarrow Q_{total}/day = Q_1 + 0.5 Q_2 \quad (10)$$

و در نهایت با ترکیب روابط (۱)، (۲)، (۹) و (۱۰) مقدار محصول در حالت تبخیر کامل آب ورودی محاسبه می‌شود. با بازیابی ۵۰٪ از

انرژی بخار تولیدی محصول به‌دست آمده در روز افزایش پیدا می‌کند که در جدول (۳) قابل مشاهده است. حال اگر از ۷۵٪ انرژی بخار استفاده شود، مشابه قبل، معادله (۱۱) برای محاسبه میزان محصول به‌دست می‌آید:

$$Q_{total}/day = Q_1 + 0.25 Q_2 \quad (11)$$

برای دستگاه به مساحت نیم متر مربع محاسبات اقتصادی طبق فرمول (۶) انجام می‌شود. هزینه آب و هزینه برق مصرفی که جزء هزینه‌های عملیاتی به شمار می‌روند از درآمد کسر می‌شود تا سود خالص محاسبه گردد. برای محاسبه میزان آب مصرفی داریم:

$$= \text{کل آب مصرفی در } 300 \text{ روز} \quad (12)$$

$$M_t \times \text{سال} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ Lit}}$$

قیمت هر متر مکعب آب ۵۰۰ تومان در سال ۹۰ برآورد می‌شود. بنابراین هزینه کل آب مصرفی در سال طبق معادله (۱۳) محاسبه می‌شود:

$$\text{هزینه کل آب} = \text{کل آب مصرفی سال} \times \text{بهای واحد آب} \quad (13)$$

هزینه برق مصرفی به ازای هر کیلووات ساعت، ۳۵ تومان در سال ۹۰ برآورد می‌شود. میزان برق مصرفی توسط پمپ ۵۰ وات و توسط کمپرسور هم ۵۰ وات می‌باشد که اگر همزمان در طی روز (۸ ساعت) روشن باشد، میزان برق مصرفی از معادله (۱۴) محاسبه می‌شود:

$$\text{برق مصرفی در سال} = \quad (14)$$

$$\left( \text{مصرف پمپ و کمپرسور} \times \text{زمان روشن بودن} \right) \times \frac{1 \text{ kWh}}{1000 \text{ Wh}}$$

هزینه برق مصرفی از معادله (۱۵) قابل محاسبه است:

$$\text{هزینه برق مصرفی در سال} = \text{کل مصرف برق} \times \text{قیمت هر کیلووات} \quad (15)$$



## ۵- نتایج و بحث

نتایج محاسبات طراحی در سه حالت ذکر شده بر مبنای ۸ ساعت در روز، بازدهی جذب انرژی ۵۰٪ و دستگاهی با ابعاد ۰/۵ متر مربع در جدول (۳) آورده شده است. مصرف برق در تمامی حالت‌ها یکسان بوده و طبق معادله (۱۴) مقدار ۲۴۰ کیلووات ساعت محاسبه می‌گردد. بنابراین هزینه برق مصرفی با استفاده از معادله (۱۵)، ۸۴۰۰ تومان برآورد می‌گردد. درآمد حاصله به ازای آب مقطر تولیدی در طول یک سال در مقایسه با هزینه ساخت دستگاه (حدود سیصد هزار تومان) و همچنین هزینه عملیاتی سالانه مقدار قابل توجهی می‌باشد. دوره بازگشت سرمایه کمتر از یک سال و دستگاه از نظر اقتصادی مقرون به صرفه می‌باشد. علاوه بر این، اگر در طی روز از انرژی بخار خروجی استفاده نشود ۸/۳۳ کیلوگرم تولید آب مقطر به ازای ۰/۵ متر مربع از دستگاه حاصل می‌شود که نسبت به حالت بازیابی انرژی، کم می‌باشد. بررسی نتایج ارائه شده در جدول (۳) نشان می‌دهد که با بازیابی انرژی بخار، تولید آب مقطر توسط دستگاه در حالت بازیابی ۵۰٪ انرژی، ۱/۷۷ برابر حالت بدون بازیابی و در حالت بازیابی ۷۵٪ انرژی، ۲/۸۸ برابر حالت بدون بازیابی انرژی می‌باشد. بنابراین بازیابی انرژی بخار نقش ویژه‌ای در بهبود

عملکرد سیستم دارد.

همانطور که مشاهده می‌شود می‌توان با استفاده از انرژی خورشیدی و هزینه بسیار پایین آب مقطر مورد نیاز برای مصارف آشامیدنی یا آزمایشگاهی را به دست آورد. دستگاه آلودگی زیست محیطی ندارد و عمر مفید حدود ۱۵ سال برای آن تخمین زده می‌شود. از مزیت‌های این دستگاه می‌توان به قابلیت بهبود عملکرد آن به کمک بازیابی انرژی بخار و افزایش شدت نور روی دستگاه تا ۳ برابر با استفاده از آینه‌های متمرکز کننده نور اشاره کرد که تا کنون در هیچ طرح داخلی به کار نرفته است. آینه‌های متمرکز کننده نور سبب می‌شوند که برای تولید یک میزان مشخص آب شیرین نیاز به دستگاهی با ابعاد کوچکتر باشد. بنابراین هزینه ساخت آن نسبت به سایر دستگاه‌های آب شیرین کن به شدت کاهش می‌یابد. مقادیر محاسبه شده میزان آب مقطر تولیدی به کمک موازنه جرم و انرژی و داده‌های تجربی برای مقایسه در جدول (۴) آورده شده است. مقادیر تجربی آب مقطر تولیدی دستگاه با اندازه سطح مقطع ۷۰×۷۰ سانتیمتر (۰/۵ متر مربع) مجهز به کمپرسور برای مکش و تراکم بخار حاصل و با فرض ۵۰٪ میزان جذب انرژی ورودی خورشیدی توسط دستگاه و تبخیر کل آب ورودی به دست آمده است.

جدول ۳- مقادیر پارامترهای محاسبه شده در سه حالت.

| پارامتر / حالت                      | $Q_1$ (J/hr) | $Q_2$ (J/hr) | $Q_{total}$ (J/hr) | $Q_3$ (J/hr) | $M_t$ (lit/day) | $m_t$ (lit/day) | هزینه آب (تومان) | درآمد (تومان) |
|-------------------------------------|--------------|--------------|--------------------|--------------|-----------------|-----------------|------------------|---------------|
| حالت ۱، جذب انرژی ۱۰٪ و بازیابی ۰٪  | ۸۴۲۰۰۰       | ۴۵۵۸۰۰۰      | ۵۴۰۰۰۰۰            | ۰            | ۱۶/۱۶           | ۲۰/۱۶           | ۳۰۲۴             | ۹۶۹۶۰۰        |
| حالت ۱، جذب انرژی ۵۰٪ و بازیابی ۰٪  | ۴۲۱۰۰۰       | ۲۲۷۹۰۰۰      | ۲۷۰۰۰۰۰            | ۰            | ۸/۰۸            | ۱۰/۰۸           | ۱۵۱۲             | ۴۸۴۸۰۰        |
| حالت ۲، جذب انرژی ۵۰٪               | ۳۵۰۰۰۰       | ۲۳۵۰۰۰۰      | ۲۷۰۰۰۰۰            | ۰            | ۸/۳۳            | ۸/۳۳            | ۱۲۵۰             | ۵۰۰۰۰۰        |
| حالت ۳، جذب انرژی ۵۰٪ و بازیابی ۵۰٪ | ۳۵۰۰۰۰       | ۲۳۵۰۰۰۰      | ۱۵۲۵۰۰۰            | ۱۱۷۵۰۰۰      | ۱۴/۷۵           | ۱۴/۷۵           | ۲۲۱۲             | ۸۸۶۰۰۰        |
| حالت ۳، جذب انرژی ۵۰٪ و بازیابی ۷۵٪ | ۳۵۰۰۰۰       | ۲۳۵۰۰۰۰      | ۹۳۷۵۰۰             | ۱۷۶۲۵۰۰      | ۲۴              | ۲۴              | ۳۶۰۰             | ۱۴۴۰۰۰۰       |

جدول ۴- مقایسه بین میزان آب تولیدی محاسباتی و اندازه‌گیری شده

| روزهای اندازه‌گیری | حالت دستگاه        | استفاده از بازیابی انرژی توسط شیشه دوجداره | مقدار تجربی آب مقطر به دست آمده (کیلوگرم در روز) | مقدار محاسباتی آب مقطر به دست آمده (کیلوگرم در روز) |
|--------------------|--------------------|--|--|---|
| روز اول            | ثابت               | خیر  | ۲/۱  | ۴/۱۶  |
| روز دوم            | ثابت               | ٪۵۰  | ۳/۵  | ۷/۳۷  |
| روز سوم            | ثابت               | ٪۷۵  | ۵/۵  | ۱۲  |
| روز چهارم          | دنبال‌کننده خورشید | خیر  | ۳/۷  | ۸/۳۳  |
| روز پنجم           | دنبال‌کننده خورشید | ٪۵۰  | ۶/۲  | ۱۴/۷۵   |
| روز ششم            | دنبال‌کننده خورشید | ٪۷۵  | ۷/۵  | ۲۴  |

بازدهی جذب ٪۵۰ جذب انرژی خورشیدی با بازیابی انرژی بخار تولیدی در دو حالت ٪۵۰ و ٪۷۵ می‌باشد. به این ترتیب دستگاه ساخته شده با ابعاد ۰/۵ متر مربع قادر است ۲۴ لیتر در روز آب مقطر تولید کند. همچنین با افزایش بازدهی جذب از ٪۵۰ به ٪۱۰۰ (ایده آل) می‌توان تولید آب مقطر را افزایش داد تا کارایی دستگاه از نظر اقتصادی افزایش یابد.

لازم به ذکر است که اگر این دستگاه توسط کارخانه و با دقت هرچه بیشتر ساخته شود مقادیر تجربی و محاسباتی به هم نزدیکتر می‌شود و خطای دستگاه کاهش می‌یابد. عواملی نظیر عدم استفاده رنگ کوره‌ای مشکلی، نشت بخار از منافذ دستگاه، عدم دقت زاویه آینه‌ها با سطح شیشه دوجداره و غیره سبب ایجاد اختلاف بین مقادیر تجربی و محاسباتی شده است.

## مراجع

- [۱] سادکین، محمد، «تحلیل اقتصادی اجتماعی بکارگیری انرژی خورشیدی در تأمین آبگرم مصرفی»، سومین همایش ملی انرژی، تهران، ۱۳۸۰، ص ۶۲۴-۶۱۷
- [2] Kalogirou, S., "The potential of solar industrial process heat applications", Appl Energy, 76, 337-61, (2003).
- [3] Trillat-Berdal, V.; Souyri, B.; Fraisse, G., "Experimental study of a ground-coupled heat pump combined with thermal solar collectors", University de Savoie, (2006).
- [4] Caruso, G., and Naviglio, A., "A desalination plant using solar heat as a heat supply, not affecting the environment with chemicals", Desalination, 122, 225-234, (1999).
- [5] Ajay Chandak & Sunil K. Somani, "Design of multistage evaporators for integrating with Scheffler Solar concentrators for food processing applications", International Solar Food Processing Conference, (2009).

## ۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به‌طور موفقیت آمیز دستگاه آب شیرین کن خورشیدی با قابلیت استفاده در منازل مسکونی طراحی و ساخته شد. این دستگاه هزینه ساخت و عملیاتی پایینی داشته، به راحتی روی پشت بام منازل مسکونی یا آزمایشگاه‌ها و غیره نصب شده و قابل استفاده در اکثر نقاط ایران می‌باشد. هزینه تمام شده برای این دستگاه در سه حالت تبخیر ٪۸۰ آب ورودی با بازدهی جذب ٪۱۰۰ و ٪۵۰ جذب انرژی خورشیدی، تبخیر ٪۱۰۰ آب ورودی با بازدهی جذب ٪۵۰ انرژی خورشیدی بدون بازیابی انرژی بخار تولیدی و تبخیر ٪۱۰۰ آب ورودی با بازدهی جذب ٪۵۰ انرژی خورشیدی با بازیابی انرژی بخار تولیدی در دو حالت ٪۵۰ و ٪۷۵ مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج به دست آمده، بهترین و مقرون به صرفه‌ترین روش برای تولید آب مقطر، تبخیر ٪۱۰۰ آب ورودی با

- [6] Souza, T.R., Salvagnini, W.M., Camacho, J.L.P., Taqueda, M.E.S., "Performance of a solar energy powered falling film evaporator with film promoter", *Energy Conversion and Management* 49, 3550-3559, (2008).
- [7] Lu, H., Walton, J.C., and Swift, A.H.P., "Desalination coupled with salinity-gradient solar ponds", *Desalination*, 136, 13-23, (2001).
- [8] Hasnain, S.M., and Alajlan, S., "Coupling of a PV-powered R.O. brackish water desalination plant with solar stills", *Renewable Energy*, 14, 281-286, (1998).
- [9] saleh al-kharabsheh, "Theoretical and experimental analysis of water desalination system using low grade solar heat", PhD thesis, university of Florida, (2003).
- [۱۰] کارنامه امور انرژی، وزارت نیرو، تیر (۱۳۷۹).
- [۱۱] شورای جهانی انرژی، منابع انرژی تجدیدپذیر نوین، (۱۳۷۵).
- [۱۲] انرژیهای نو مجموعه مقالات، وزارت نیرو- امور انرژی، دفتر انرژیهای نو، (۱۳۷۶).
- [۱۳] مجید عمیدپور، محمد ضامن، سید مهدی سوفاری، «بهینه‌سازی مصرف انرژی در آب شیرین کن HD خورشیدی»، ششمین همایش ملی انرژی، تهران، خرداد (۱۳۸۶).
- [14] Mertes C., "Seawater Desalination as a Chance for Water Supply", International Seminar on Water Desalination Technologies, Tarbiat Modarres University, Tehran, Iran, Nov. (2006).
- [15] Al-Hallaj S., Selman J.R., A Comprehensive Study of Solar Desalination with a Humidification-Dehumidification Cycle, The Middle East Desalination Research Center, R&D Report, Muscat, Sultanate of Oman, April (2002).
- [۱۶] جی.ام. اسمیت، اچ. سی.ون نس، «ترمودینامیک مهندسی شیمی»، جلد اول، ویرایش چهارم، ترجمه منصور کلباسی، تهران، جهاد دانشگاهی، واحد صنعتی امیرکبیر، (۱۳۷۴-۱۳۷۶).